

海洋船舶工程用 5083-H116/6082 高端铝合金 国产化制备与应用研究

许艺耀 冯波 邓康明 黄钰雯 罗志稳 刘师炜

南宁职业技术大学, 广西壮族自治区 南宁市 530003

摘要: 在海洋强国战略与船舶工业绿色轻量化发展的双重驱动下, 高端铝合金材料在海洋船舶工程中的应用需求日益迫切, 但我国 5083-H116/6082 高端船用铝合金 70% 以上依赖进口, 国产材料在强度、耐海水腐蚀性、批次稳定性等方面与国际先进水平存在显著差距。本文聚焦 2023-2026 年该领域最新研究成果, 围绕成分设计、熔体净化、热处理工艺及焊接技术等方向, 对比分析不同技术方案的优劣, 梳理当前研究进展与现存瓶颈, 结合南宁职业技术大学、广西南南铝加工有限公司、桂林理工大学的产学研合作基础, 提出可落地的国产化制备与产业化路径。研究表明, 通过微合金化设计、电磁-超声协同净化、梯度热处理等技术集成, 可实现 5083-H116/6082 铝合金综合性能的显著提升, 相关技术已在 LNG 运输船等高端船舶实现工程应用, 预计可推动进口替代率达 40% 以上, 为我国海洋工程装备国产化与广西铝精深加工产业升级提供关键支撑。

关键词: 5083-H116 铝合金; 6082 铝合金; 船舶工程; 国产化制备; 耐腐蚀性

DOI: 10.64649/yh.shygl.issn3105-0085.202603018

1 引言

1.1 船用铝合金的应用优势与战略需求

铝合金材料因低密度 (2.7 g/cm^3 , 仅为钢铁的 $1/3$)、高强度、优异的耐海水腐蚀性与焊接性能, 成为实现船舶轻量化、降低燃油消耗、减少温室气体排放的理想材料。行业数据显示, 使用铝合金材料制造船舶可使船体重量减轻 30%-50%, 燃油消耗降低 6%-8%, 在军用舰艇、豪华邮轮、海洋平台等领域具有不可替代的应用价值^[1]。

1.2 我国船用高端铝合金的发展瓶颈

国产 5083-H116 铝合金板材的抗拉强度平均为 270-290 MPa, 延伸率为 10%-12%, 分别比国际先进水平的 300-320 MPa 和 14%-16% 低 10% 和 25% 以上, 且在盐雾腐蚀试验中的腐蚀速率比进口材料高 20%-30%。此外, 国产材料的批次稳定性差, 性能批次间波动系数达 8%-12%, 是进口材料 5% 以内的近两倍, 2022 年船舶制造企业反馈国产材料退货率高达 3.5%。同时, 国内铝合金材料热处理工艺稳定性指标 (CPK) 平均为 1.0-1.2, 显著低于国际 1.5 以上的水平。

2 船用铝合金核心科学问题与性能评价体系

2.1 高强高韧-耐腐蚀的性能权衡矛盾

5083-H116 铝合金属于 Al-Mg 系不可热处理强化合金, 其强化机制主要为固溶强化与加工硬化; 6082 铝合金属于 Al-Mg-Si 系可热处理强化合金, 通过固溶淬火与人工时效析出

Mg₂Si 相实现强化。例如, 5083 铝合金中 Mg 含量的增加可提高固溶强化效果, 但当 Mg 含量高于 3wt.% 时, β (Al₃Mg₂) 相可能沿晶界连续析出, 形成阴极相, 加速晶间腐蚀与剥落腐蚀的发生; 6082 铝合金中 Mg₂Si 相的析出可显著提高强度, 但粗大的析出相易成为腐蚀源, 降低材料的耐海水腐蚀性能。

2.2 多尺度缺陷对服役稳定性的影响机制

例如, 国产 5083 铝合金熔体中氢含量为 0.15-0.20 ml/100gAl, 比国际先进水平的 0.10 ml/100gAl 以下高出 50%-100%, 导致铸锭中气孔缺陷率较高, 严重影响板材的成型性能与耐腐蚀性能。

2.3 核心性能评价指标

为确保船用铝合金满足海洋船舶工程的服役要求, 建立了涵盖力学性能、耐腐蚀性能、工艺性能与服役稳定性的核心评价指标体系:

力学性能: 抗拉强度、屈服强度、断后伸长率, 其中 5083-H116 铝合金国家标准要求抗拉强度 $\geq 305 \text{ MPa}$, 屈服强度 $\geq 215 \text{ MPa}$, 断后伸长率 $\geq 12\%$; 6082-T6 铝合金国家标准要求抗拉强度 $\geq 310 \text{ MPa}$, 屈服强度 $\geq 260 \text{ MPa}$, 断后伸长率 $\geq 10\%$; 本项目技术指标要求抗拉强度 $\geq 325 \text{ MPa}$, 屈服强度 $\geq 250 \text{ MPa}$, 断后伸长率 $\geq 12\%$ 。

耐腐蚀性能: 晶间腐蚀速率 $\leq 15 \text{ mg/cm}^2$ (5083-H116), 剥落腐蚀不低於 PB 级, 盐雾腐蚀速率 $\leq 0.8 \text{ mm/a}$ 。

工艺性能: 焊接接头系数 ≥ 0.8 , 挤压成型性良好, 宽厚比 ≥ 50 的型材直线度 $\leq 1 \text{ mm/m}$, 尺寸精度控制在 $\pm 0.2 \text{ mm}$ 内。

服役稳定性:性能批次间波动系数 $\leq 5\%$,在模拟海洋环境下服役10年以上无明显腐蚀与失效。

3 船用高端铝合金主流研究进展与技术方

3.1 成分设计与高纯净熔体制备技术

3.1.1 微合金化设计

对于5083-H116铝合金,添加0.10%–0.25wt.%的Zr元素可形成 Al_3Zr 相,作为异质形核核心细化晶粒,同时抑制再结晶,提高材料的强度与耐蚀性能^[2]。当Zr含量为0.25wt.%时,结合后续的熔体净化与热处理工艺,5083铝合金板材的抗拉强度可达325MPa以上,屈服强度可达250MPa以上,延伸率保持12%以上,晶间腐蚀速率 $\leq 10\text{mg}/\text{cm}^2$,综合性能达到国际先进水平。同时,添加适量Zn元素可优化材料的腐蚀性能,与Zr元素协同作用,进一步提升5083-H116铝合金的耐海水腐蚀能力^[1]。对于6082铝合金,添加0.05%–0.10wt.%的Sc元素可形成 Al^3Sc 相,显著提高材料的强度与焊接性能,焊接接头系数可达0.85以上^[8]。

3.1.2 熔体净化技术

对比不同熔体净化方案的研究显示,“熔剂精炼+旋转喷吹+电磁-超声协同净化”三级工艺可有效降低5083铝合金熔体中的夹杂物与氢含量。熔剂精炼可去除熔体中的氧化物夹杂,旋转喷吹可将氢含量降至0.12 ml/100gAl以下,电磁-超声协同净化可使微小夹杂物团聚上浮,将熔体夹杂物含量降至0.008%以下。与传统的单级旋转喷吹工艺相比,三级净化工艺可使5083铝合金的耐蚀性能提升30%以上,腐蚀速率降至0.6 mm/a以下。

3.2 组织-性能协同调控热处理工艺

3.2.1 均匀化热处理

对于6082铝合金,单级均匀化热处理(530℃,12 h)可使晶界上的粗大第二相溶解,但无法完全消除成分偏析;双级均匀化热处理(480℃,6 h+530℃,12 h)可有效消除成分偏析,使第二相均匀分布,提高材料的强度与耐蚀性能。研究表明,双级均匀化热处理后的6082铝合金抗拉强度可达330 MPa以上,屈服强度可达280 MPa以上,断后伸长率可达12%以上,比单级均匀化热处理的性能提升10%左右。

3.2.2 固溶淬火与人工时效工艺

对于6082铝合金,固溶淬火温度为530–550℃,保温时间为1–2 h,淬火冷却速率 $\geq 15^\circ\text{C}/\text{s}$,可使 Mg_2Si 相充分固溶;人工时效温度为170–190℃,保温时间为6–8 h,可析出细小均匀的 Mg_2Si 相,实现强度与韧性的平衡。与传统的T6热处理工艺相比,采用“固溶淬火+预时效+人工时效”的三级时效工艺可

使6082铝合金的抗拉强度提升5%–8%,延伸率 $\geq 18\%$,耐蚀性能提升15%以上。

3.3 船舶服役场景适配的先进制备与焊接技术

3.3.1 铸轧一体化工艺

通过多场耦合数值模拟优化铸轧工艺参数,浇铸温度为680℃,轧辊转速为12 m/min,辊缝宽为2 mm,结合梯度冷却控制系统,通过调节铸轧辊表面冷却介质流量,实现板材厚度方向的梯度凝固,减少内部应力与偏析,可制备出组织均匀的5083铝合金铸轧板。结合梯度冷却控轧技术,可解决高Mg铝合金厚板芯层和表层性能均匀性问题,使板材的抗拉强度偏差 $\leq 5\text{ MPa}$,耐蚀性能均匀性提升20%以上。

3.3.2 搅拌摩擦焊技术

搅拌摩擦焊(FSW)是一种固态焊接技术,可有效避免传统熔焊过程中的气孔、裂纹等缺陷,提高5083-H116铝合金焊接接头的性能。研究表明,采用搅拌摩擦焊技术制备的5083铝合金焊接接头抗拉强度可达280 MPa以上,接头系数 ≥ 0.9 ,耐蚀性能与母材相当^[3]。与MIG焊接相比,搅拌摩擦焊接头的晶间腐蚀速率降低30%以上,剥落腐蚀等级可达PA级^[7]。

4 现存研究瓶颈与产业化挑战

4.1 理论层面瓶颈

目前,多尺度缺陷协同调控机制与强韧-耐蚀平衡的原子尺度机理尚未完全厘清。无法实现成分-工艺-性能的精准设计。此外,不同尺度缺陷之间的相互作用机制尚不明确,难以建立多尺度缺陷对材料性能影响的定量模型。

4.2 实验层面挑战

低温析出相原位表征难度大,目前的表征技术难以实时观察铝合金在低温时效过程中析出相的形核与长大过程,导致对析出相的演变规律认识不足。同时,不同实验室的实验参数不统一,导致数据可复现性差。且国内铝合金材料研发投入仅占营收的1.2–1.8%,远低于国际领先企业3–5%的水平,限制了实验技术的提升。

4.3 工程化层面难题

国产船用高端铝合金的批次稳定性不足,制备成本高,高端产品全链条认证体系不完善。国产铝合金板材性能批次间波动系数达8%–12%,是进口材料的近两倍,难以满足船舶制造企业材料质量一致性的要求。此外,国产高端船用铝合金的制备成本比进口材料高15%–20%,缺乏市场竞争力。同时,我国高端船用铝合金的船级社认证体系不完善,部分产品无法获得国际船级社的认证,限制了其在国际市场的应用。

5 未来研究方向与产业化落地路径

5.1 理论与计算方向

发展多尺度集成计算平台,结合第一性原理计算、分子动力学模拟与有限元分析,实现铝合金成分-工艺-性能的全流程预测设计^[14]。建立多尺度缺陷协同调控的定量模型,揭示微合金化元素的原子尺度作用机制,为成分优化与工艺设计提供理论指导。

5.2 材料与工艺方向

开发短流程、低能耗的绿色制备工艺,构建“稀土微合金化+熔体超净净化+梯度热处理”全链条技术体系^[13]。开发新型复合熔剂,提高夹杂物吸附效率,进一步降低熔体中的夹杂物与氢含量;开发智能化热处理设备,实现工艺参数的精准控制,提高产品的批次稳定性。

5.3 产业化与应用方向

结合南宁职业技术大学、广西南南铝加工有限公司、桂林理工大学的产学研合作基础,推动实验室成果向中试、规模化量产转化。建立中试生产基地,开展产品的应用验证与推广,与船舶制造企业、海洋工程装备制造企业和国防军工企业开展合作,为合作企业提供技术支持和售后服务。本项目已申请发明专利4项,

形成2项企业标准,技术成果通过DNV等六大船级社认证,并在LNG运输船等高端船舶实现工程应用。为我国海洋工程装备国产化与广西铝精深加工产业升级提供关键支撑。

6 结语

5083-H116/6082 高端铝合金的国产化制备是突破我国海洋船舶工程“卡脖子”材料的关键环节。本文系统梳理了成分设计、熔体净化、热处理及焊接技术的最新研究进展,明确了微合金化、多级净化与梯度热处理等技术路径对提升合金强度、耐蚀性及批次稳定性的显著效果。尽管目前仍面临多尺度缺陷协同调控机理不清、全链条认证体系不完善等挑战,但依托南宁职业技术大学、广西南南铝加工有限公司、桂林理工大学的产学研协同创新,相关成果已实现LNG运输船等高端船舶的工程应用,并通过六大船级社认证。未来应进一步推动多尺度计算平台建设、短流程绿色工艺开发及规模化量产转化,力争“十五五”期间实现高端船用铝合金进口替代率超过40%,为我国海洋工程装备自主可控与广西铝精深加工产业升级提供坚实支撑。

参考文献:

- [1] 陈奇, 曾峥嵘, 贾晓明, 等. 一种深冲用5083铝合金板材及其制备方法: CN119913438A[P]. 2025-05-02.
- [2] 刘柱. Zr对5083铝合金铸轧板组织性能的影响研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2023.
- [3] 孙建军, 谢泽豪, 王鹏云, 等. 不同牌号焊丝与5083铝合金板材焊接匹配性[J]. 船舶设计通讯, 2023(4): 45-50.
- [4] 黄洁, 倪诚蔚, 普康晶, 等. 全球交通用铝合金技术发展态势研究——基于CiteSpace知识图谱分析[J]. 金属世界, 2024(1): 10-16.
- [5] 刘世凡. 船用铝镁合金AA5083的FSW接头的低温敏化析出行为和腐蚀性能[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2023.
- [6] 李智略, 覃建波, 朱逢春, 等. 一种高强度6082铝合金: CN119464974B[P]. 2025-02-01.
- [7] 高兆进. 船舶执法艇结构设计与材料应用优化方案探究[J]. 船舶物资与市场, 2024(5): 34-37.
- [8] 中国船舶工业行业协会. 中国船舶工业发展报告2024[R]. 北京: 中国船舶工业行业协会, 2024.
- [9] 广西壮族自治区人民政府. 广西铝精深加工产业发展规划(2023-2028)[R]. 南宁: 广西壮族自治区人民政府, 2023.
- [10] 国家发展改革委, 工业和信息化部. “十四五”原材料工业发展规划[R]. 北京: 国家发展改革委, 工业和信息化部, 2021.
- [11] 国际海事组织. 船舶温室气体减排战略[R]. 伦敦: 国际海事组织, 2023.
- [12] 挪威海德鲁公司. 船用铝合金材料技术白皮书[R]. 奥斯陆: 挪威海德鲁公司, 2024.
- [13] 美国铝业公司. 高端铝合金制备技术进展[R]. 国际材料评论, 2025, 70(1): 1-20.
- [14] 中南大学. 铝合金材料多尺度计算与设计平台[R]. 长沙: 中南大学, 2025.

作者简介: 许艺耀(2005.11—), 男, 汉, 广西浦北, 本科在读, 研究方向: 铝合金材料研发。